



Klímaváltozási jelenségek modellezése egy elméleti vízi ökoszisztémában

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Horváthné Drégelyi-Kiss Ágota

Budapest

2011

A doktori iskola

megnevezése: Budapesti Corvinus Egyetem
Tájépítészeti és Tájökológiai Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki

Vezetője: **Csemez Attila, DSc**
tanszékvezető egyetemi tanár
Budapesti Corvinus Egyetem
Tájtervezési és Területfejlesztési Tanszék

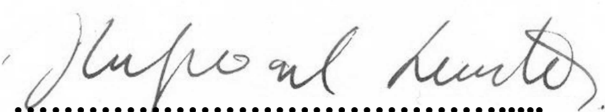
Témavezető: **Hufnagel Levente, PhD**
tudományos főmunkatárs
MTA – BCE „Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz”
Kutatócsoport

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.



.....

Az iskolavezető jóváhagyása



.....

A témavezető jóváhagyása

BEVEZETÉS

Az elmúlt évek, évtizedek során megfigyelhető és tapasztalható, hogy a globális klímaváltozás hatással van mindennapi életünkre, hiszen egyre gyakrabban fordulnak elő szélsőséges időjárási viszonyok, amelyek nem csak hazánkra vagy Európára jellemzőek, hanem az egész bolygónkra. 2007-ben elkészült az IPCC negyedik összefoglaló jelentése, amelyben a legfrissebb kutatási eredmények szerint a Föld átlaghőmérséklete kb. 0,6 °C-ot emelkedett az elmúlt 100 évben, ennek a hatása már látszik, és a XXI. századra 2 – 4 °C-os emelkedés várható. A klímaváltozás érinti gazdasági és társadalmi életünk minden szektorát, és hatással van a természetes ökológiai rendszerekre is.

A természetes ökológiai rendszereknél dinamikus egyensúly figyelhető meg a klíma és ökoszisztémák között. Ennek értelmében, ha a rendszert valamilyen hatás éri, akkor erre válaszreakció indul az egyensúly fenntartása érdekében. Ennek mértéke lehet hirtelen bekövetkező, azaz ugrásszerű, másrésről pedig fokozatos. Azonban a jelenleg kialakult helyzetben alighanem a kiszámíthatatlan, ugrásszerű változások fognak dominálni.

Doktori munkám során egy elméleti édesvízi algaközösség modellt dolgoztam ki (TEGM, Theoretical Ecosystem Growth Model). A modell segítségével az ökoszisztéma és különböző, elméleti és valós klímatis viszonyok között kialakuló egyensúly útját és eredményét vizsgáltam.

CÉLKITŰZÉSEK

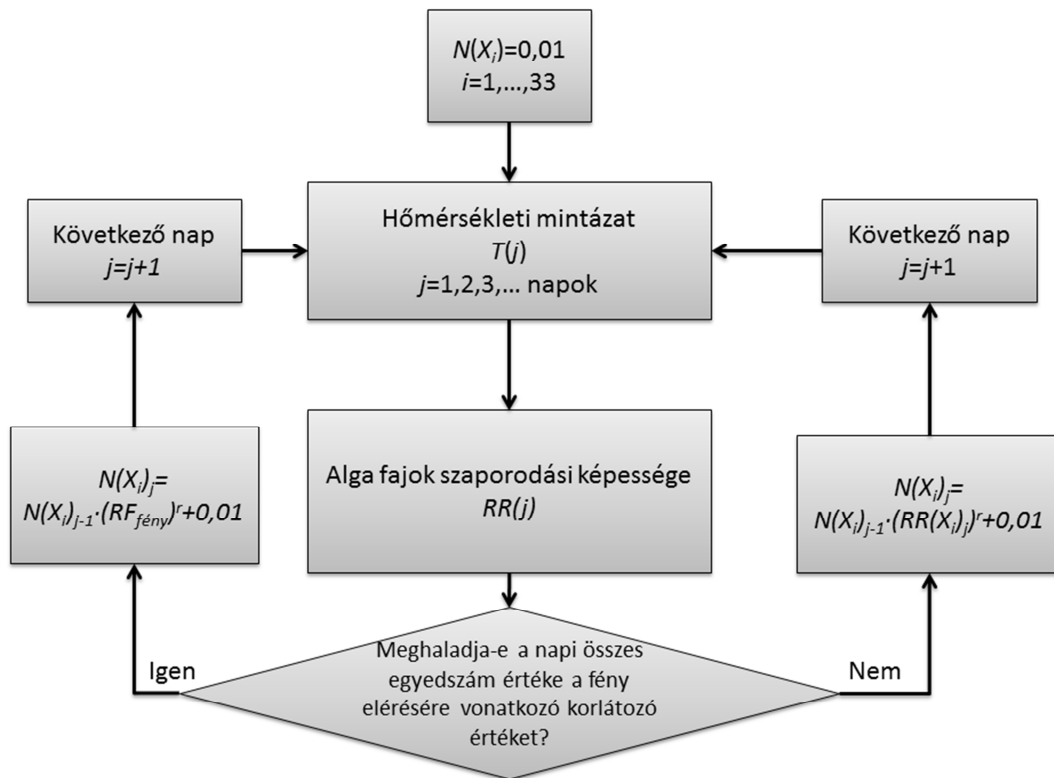
Doktori munkám alapján egy komplex stratégiai klíma-ökoszisztéma modell kidolgozását tekintem, amely segítségével a klíma hőmérsékleti megváltozásának hatását lehet vizsgálni a mesterséges ökoszisztéma összetételére, diverzitására.

- Céлом volt egy elméleti klíma-ökoszisztéma rendszer modell kidolgozása a klíma hőmérsékleti megváltozásának vizsgálataira.
- Az elméleti ökoszisztéma aktív részvételével a szén-körforgásban lehetőség nyílik arra, hogy a hőmérsékleti-klíma szabályozóképesége is vizsgálható legyen a csoportosulásnál. A szabályozó hatás vizsgálatára szeretnék egy egyszerű modellt kifejleszteni.

A stratégiai modellek felépítése után célom a felmelegedés és hőmérsékleti ingadozások hatásait elemezni az elméleti vízi ökoszisztéma esetén.

A KIDOLGOZOTT ELMÉLETI ÖKOSZISZTÉMA NÖVEKEDÉSI MODELL (TEGM) BEMUTATÁSA

Az elméleti ökoszisztéma egy algaközösséget modellez egy szárazföldi vízi közösségben. A vízi ökoszisztémát leíró TEGM modell folyamatábrája (1. ábra) leírja a modellezés során végbemenő matematikai számításokat. A modellnek két fontos bemeneti paramétere van: az egyik a különböző szaporodási függvények, a másik a hőmérsékleti mintázat függvénye. A populációdinamikai folyamatok jobb megértése céljából a hőmérsékleti függvényeket a lehető legegyszerűbb, konstans hőmérsékleti függvénytől az összetettebb hőmérsékleti-klíma mintázatokig vizsgáltam, amelyek már a valós hőmérsékleti viszonyokat írják le.



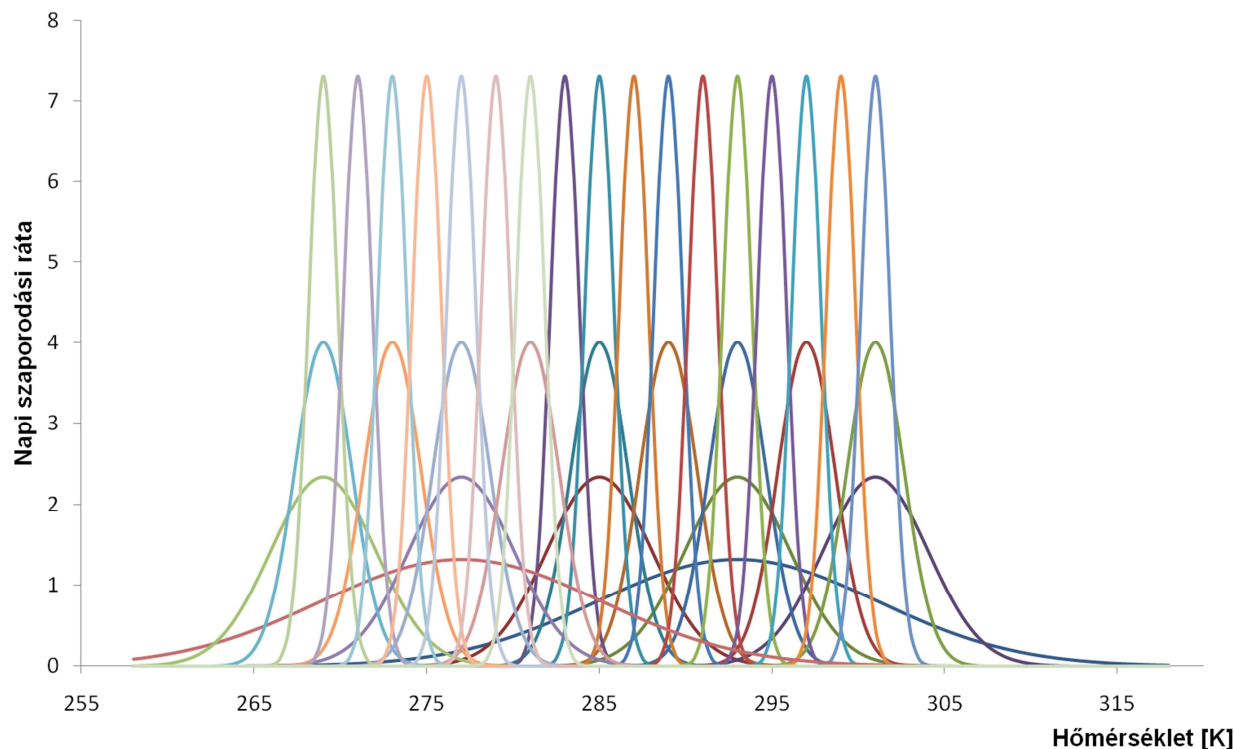
1. ábra: A növekedési modell folyamatábrája

A hőmérséklet megváltozásának hatására az elméleti ökoszisztéma fajai között kompetíció alakul ki. A versengés hatására bizonyos fajok egyedszáma megnövekszik, némely faj pedig nem jelenik meg. A populáció növekedése a modellbe beépített korlátozás miatt nem lehet végtelen. A hőmérsékleti bemeneti értékre az ökoszisztéma egy dinamikus egyensúlyi állapotot ér el, amely során kimeneti paraméterként vizsgálom a domináns fajokat és azok egyedszámát, a forráskihasználás mértékét, az ökoszisztéma diverzitását, valamint az egyensúly kialakulásának időtartamát.

Egy algafajt jellemez az a hőmérsékleti intervallum, amely az adott faj szaporodását lehetővé teszi. A fajok a hőmérsékleti érzékenységüknek megfelelően szűkebb (specialista) vagy szélesebb

(generalista) intervallumban képesek a fajfenntartásra. A fajok hőmérsékleti optimum görbéjének leírására a Gauss- (normál-) eloszlást használom úgy, hogy a hőmérsékleti optimum a várható érték.

A vizsgált hőmérsékleti tartomány a mérsékelt övi hőmérséklet-ingadozásnak felel meg. A 2. ábra mutatja a 33 különböző érzékenységu alfafaj szaporodási képességét a hőmérséklet függvényében. A függőleges tengelyen a fajok napi szaporodási rátáját láthatjuk. Ez megfelel az édesvízi algák szaporodási képességének a mérsékelt övben.



2. ábra: 33 alfafaj hőmérsékleti eloszlása

Miután a szaporodási képesség egy adott hőmérsékleten adott, azért egy napi átlaghőmérséklethez egyértelműen meghatározható, hogy az adott faj mekkora egyedszámmal van jelen.

Kezdeti értéknek 0,01 db egyedszámot feltételeztem minden egyes fajra, majd a következő minimumfüggvény segítségével határoztam meg az egyedek számát:

$$N(X_i)_1 = 0,01 \quad \text{minden } i=1,2, \dots, 33 \text{ fajra,}$$

ahol $N(X_i)$: az i -edik faj egyedszáma

$$N(X_i)_j = N(X_i)_{j-1} \cdot \text{Min} \left\{ \left(RR(X_i)_j \right)^r ; (RF_j)^r \right\} + 0.01 \quad (1)$$

ahol j : a napok száma (általános esetben $j=1,2,\dots,10593$; 29 év időtartam);

$RR(X_i)_j$: X_i faj szaporodási ráta értéke a j -edik napon;

r : sebességi paraméter ($r=1$ ill. $0,1$);

$$RF_k = a \left(1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{33} N(x_i)}{K_k} \right)^v \right) \quad (2)$$

$k=1,2,\dots,366$, az adott év napjának sorszáma (év-nap);

Az összes egyedszámot korlátozó K_k értékét a szimulációs kísérletek első fázisában 10^7 értéknek határoztam meg (TEGMa-modell), a második részben figyelembe vettem a fény intenzitásának egy adott éven belüli ingadozását, az alábbi függvénnyel írtam le a korlátozást (TEGMb-modell):

$$K_k = d_1 \cdot \sin(d_2 \cdot k + d_3) + d_4 + \varepsilon \quad (3)$$

$d_1=4950000$, $d_2=0,0172$, $d_3=1,4045$, $d_4=5049998$, ε : egyenletes eloszlású valószínűségi változó a $(-50000,50000)$ intervallumban.

A konstans értékek a K_j korlátozó függvény esetén úgy lettek beállítva, hogy a függvény periódusa 365,25 és a maximum és a minimum hely (június 23 ill. december 22) adott. (Legnaposabb és legkevesbé napos napok az évben.)

Hőmérsékleti mintázatok és vizsgálójelek

Kutatásomban az elméleti vízi ökoszisztéma alga-közösségeinek a megoszlását vizsgáltam a hőmérséklet különböző típusú megváltozásának hatására. Attól függően, hogy a hőmérséklet milyen módon változik, és milyen értéket vesz fel, más és más faj kerül ki a versengésből győztesen. A hőmérséklet beállítását tervszerűen változtattam, hogy az egyes hatásokat elkülönülten értékelhessem, a szimuláció időtartama 30 év volt a vizsgált esetekben. A sebességi paramétert két értéken beállítva két kísérletsorozatot futtattam.

A vizsgált hőmérsékleti függvények az alábbiak voltak:

- Konstans hőmérséklet (293K, 294K, 295K)
- Egy éven belüli ingadozás szinusz függvény szerint
- Múltbeli és jövőbeli hőmérsékleti klíma mintázatok
 - Historikus hőmérsékleti adatok Magyarországon (1960-1990)
 - Jósolt hőmérsékleti adatok Magyarországra (2070-2100)
 - Hőmérsékleti értékek Budapestre 140 év időtartamra (1960-2100)
 - Magyarországra jósolt hőmérsékleti viszonyok analógiája 2100-ra
 - Historikus nemzetközi adatok a Föld különböző éghajlatú helyein

Az elméleti ökoszisztéma modell egyensúlyra való beállítását három vizsgálójel alkalmazásával vizsgáltam meg. Az egyik az ún. impulzus vizsgálójel vagy Dirac delta függvény, a másik vizsgálójel az egységugrás függvény, amely segítségével a vizsgálójelek reprezentálják a

hőmérséklet hirtelen, impulzus-szerű megváltozását, valamint a hőmérséklet ugrásszerű megváltozását. A harmadik vizsgálójel a hőmérséklet folyamatos, lineáris növekedését hivatott vizsgálni.

A diszturbanciák vizsgálata során a napi hőmérsékleti ingadozások hatását is fontos vizsgálni. Az egymás után következő napok közötti véletlen hőmérsékleti ingadozást úgy modelleztem, hogy véletlen, egyenletes eloszlású valószínűségi változóként képzelem el a diszturbanciát ($\pm 1\text{K} \dots \pm 11\text{K}$ közötti hőmérsékletekkel). A hipotetikus konstans, szinusz függvény szerinti és az egyenletesen növekvő hőmérsékletre adott véletlen ingadozás hatását elemeztem a szimulációs kísérletek során.

A szabályozó hatás matematikai megfogalmazása

Az ökoszisztémák működésük során a klíma-ökoszisztéma rendszer visszacsatolásán keresztül befolyásolhatják a környezetüket, a helyi és globális klíma viszonyokat. Az elméleti ökoszisztéma modell szabályozó hatásának vizsgálatát végeztem el a globális szén-cikluson keresztül.

Az elméleti ökoszisztémát úgy képzelem el, hogy az ökológiai rendszer által tárolt szén egy része, a biomassza mennyisége vagy a növényzet felépítésében vesz részt vagy a légkör szén-tartalmát befolyásolja. Tegyük fel, hogy az élőlény az elpusztulása pillanatában már légköri CO_2 -dá alakul. A növényi biomassza produkciójaként a nettó primer produkció (NPP) értékét veszem figyelembe.

Az elméleti ökoszisztéma szabályozó hatását budapesti historikus adatsorra dolgoztam ki TEGMb modell esetén, $r=1$ beállításra. A szimulációs kísérlet során többféle hőmérsékleti adatsort használtam, ill. számítottam ki:

T(0): azokat a hőmérsékleti adatsorokat jelenti, amelyben nincs jelen az ökoszisztéma visszacsatoló hatása a klímára, a historikus adatsorok esetén azt a hőmérsékletet jelzi, amely az eredeti hőmérsékleti adatsorból az ökoszisztéma visszacsatoló képességét elveszjük.

T(1): olyan hőmérsékleti adatsorra utal, amely az ökoszisztéma hőmérsékletre való szabályozását tartalmazza, vagyis a historikus adatsor.

T(2): olyan hőmérsékleti adatokat tartalmaz, amely mentes az ökoszisztéma szabályozó hatásától, de az antropogén hatásokkal terhelt.

T(3): ezen adatsor tartalmazza mind az antropogén, mind pedig az ökoszisztéma szabályozó hatását is.

ELMÉLETI ÖKOSZISZTÉMA MODELL SZIMULÁCIÓS KÍSÉRLETEI KÜLÖNBÖZŐ KLIMATIKUS KÖRÜLMÉNYEK ESETÉN

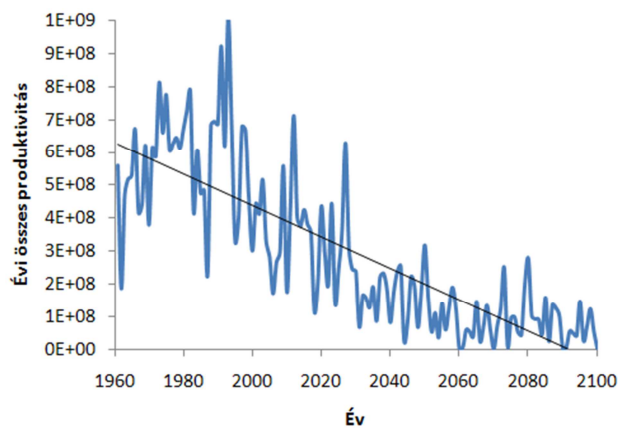
A hipotetikus konstans hőmérsékletet vizsgálva megállapítható, hogy a fajok versengése során az adott hőmérsékletnek leginkább megfelelő specialista és átmeneti fajok az uralkodóak, de kis mértékben megjelenik generalista és szupergeneralista faj is, a forráskihasználás 100 %-hoz közelít. A szimulációt elvégezve a maximális forráskihasználást a gyorsabb szaporodási képességű ökoszisztéma esetén belengések során éri el, míg a lassabb esetben rásimul a maximális értékre.

Az egy éven belüli hőmérsékleti ingadozás szinuszos függvény szerinti szimuláció során megjelenő fajok folyamatosan változnak attól függően, hogy a szinusz függvénynek mekkora az amplitúdója, az éves ingadozása. Az évi hőmérsékleti ingadozás növekedésével egyre inkább megfigyelhetők az egyes évszakoknak megfelelő faj-csoportosulások (tavasz, nyár, ősz, tél).

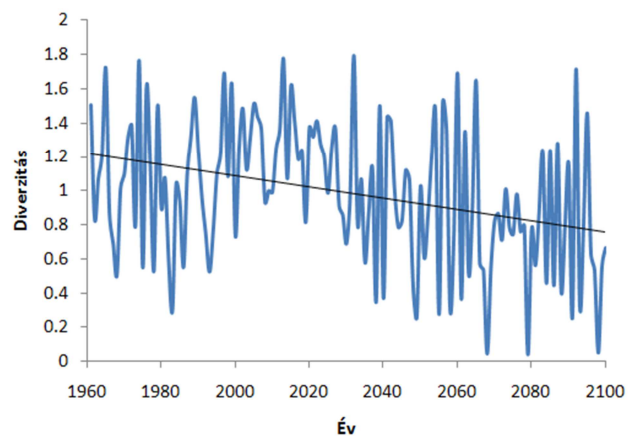
Magyarországra vonatkozó hőmérsékleti klíma mintázatok vizsgálatakor az ökoszisztéma a szimulációs kísérletek során mindkét sebességi paraméter esetén eléri az egyensúlyt. A gyorsabb sebességi faktorú ökoszisztéma sok specialista és közepes fajjal van jelen. A nyári időszakban elegendő sokáig tartó állandó hőmérsékletnek köszönhetően a gyorsabb és a lassabb szaporodási képességű ökológiai rendszerek közel azonos képen mutatnak.

A 140 éves adatsor elemzésével képet kaphatunk arról, hogy a klímaváltozás milyen szezonális dinamikai eltéréseket eredményezhet. A stratégiai modell szimulációja alapján megállapítható, hogy a HC A2 scenárió szerinti eredményeit alkalmazva, a novembertől – májusig terjedő időszakban alig várható jelentős változás az össz-egyedszámban és annak szezonális dinamikájában. Nagyon drasztikus változások látszanak azonban a júniustól októberig terjedő időszakban. A fajkompozíciót tekintve természetesen a téli félév is jelentős változásokat mutat, de ezek az összmenyiséget nem érintik, mivel itt inkább fajkicserélődésekről van szó. Az évi összes egyedszám értéke folyamatos csökkenést mutat a 140 év folyamán (3. ábra). A diverzitás értékét vizsgálva átlagosan csökkenés jelentkezik az egy évre vonatkozó diverzitás értékében a vizsgálat időszakában. (4. ábra)

A Magyarországgal analóg hőmérsékleti függvényű helyek klíma viszonyait vizsgálva az ökoszisztéma összetételeit össze kell hasonlítani mind a múltbeli magyarországi adatokkal, mind pedig a jövőbeli becslésekkel. Turnu Magurele esetén a kapott fajösszetétel inkább a múltbeli adatokéhoz hasonló, a jövőre vonatkozó becslésekkel hasonlóság a téli időszakokban van. Kairó jelenlegi hőmérsékleti körülményei jól mutatják a hasonlóságot a MPI 3009 2070-2100-ra jósolt eredményeivel.

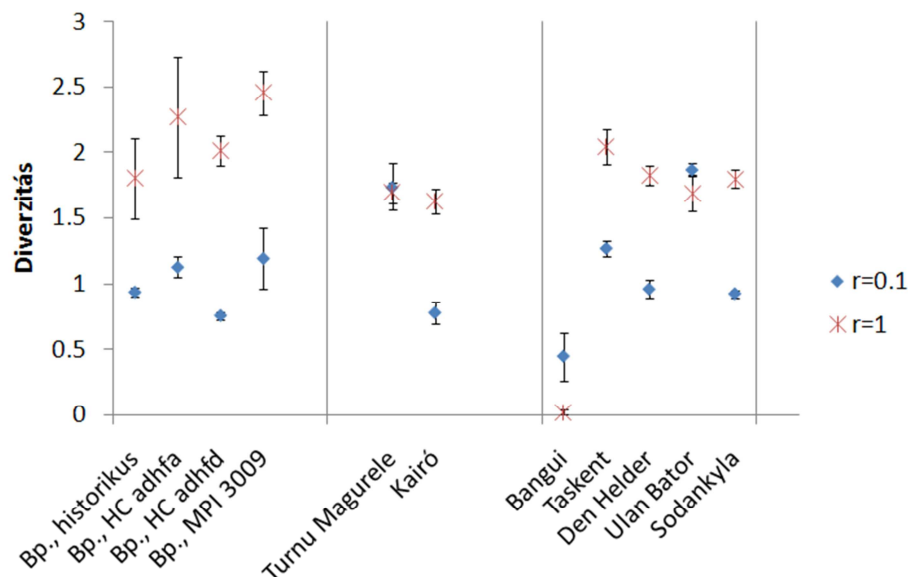


3. ábra: Éves összes produktivitás változása 140 év alatt a TEGMb modell futtatása során



4. ábra: A diverzitás változása 140 év alatt a TEGMb modell futtatása során

Az ökoszisztéma évi összes egyedszámát vizsgálva azt találtam, hogy a különböző klímával rendelkező környezetek a gyorsabb ökoszisztéma esetén elősegítik az egyedek közel maximális jelenlétét. A lassabb szaporodási képességű ökoszisztéma esetén egy klíma esetén (Bangui) lehet elérni a maximális évi egyedszámot. A gyorsabb és a lassabb esetek évi összes egyedszám értékei közötti eltérés Ulan Bator esetén a legnagyobb. A kísérletek reprodukálhatósága a legtöbb esetben megfelelő (kisméretű kerítések). Az évi összes egyedszám értéke 10^9 értéket jelez az $r=1$ esetben bármely klimatikus környezetre. A diverzitás a gyorsabb folyamat esetén 1,5 és 2,5 értékek közé esik, ez alól kivételt Bangui jelent közel 0 diverzitás indexszel (5. ábra).

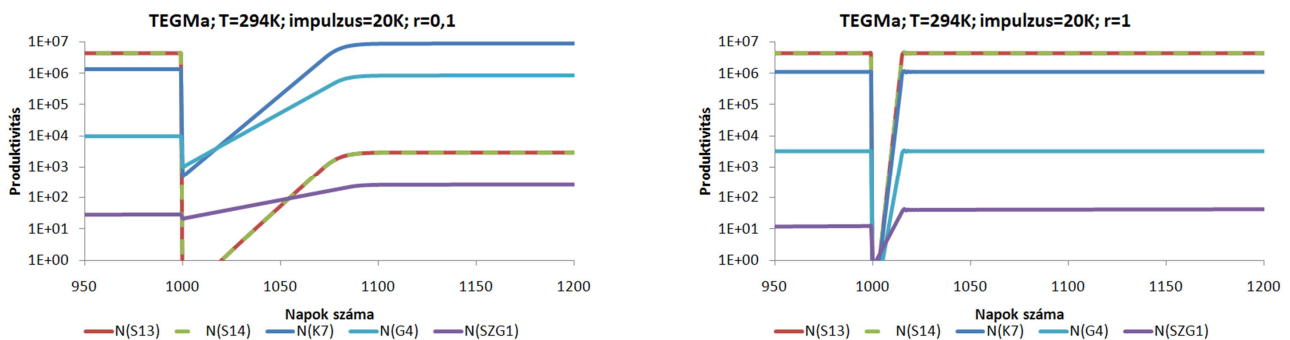


5. ábra: A diverzitás értékek a valós vagy jövőbeli klíma-mintázatokra TEGMb modell esetén, mindkét sebességi paraméter beállításával (A szimulációkat tízszer megismétltem, ezért a diverzitásértékek átlagai mellett a számított egyszeres szórás felfelé és lefelé megjelenítésre került.)

DISZTURBANCIA HATÁSA A KÖZÖSSÉG ADAPTÁLTSÁGÁRA A TEGM MODELLBEN

Egységimpulzus vizsgálata

A gyorsabb és a lassabb szaporodási képességű ökoszisztémákat összevetve azt láthatjuk, hogy hasonló az egyensúlyi összetétel változása, ha $r=1$ esetében 3K impulzus éri és $r=0,1$ esetében 10K impulzus éri a rendszert, valamint ha $r=1$ esetében 5K és $r=0,1$ esetében 15K impulzus éri az ökoszisztémát. A gyorsabb szaporodási képességű ökoszisztéma esetén, ha 15K vagy annál nagyobb impulzus éri a rendszert, akkor az egyensúlyi összetételek azonosak a beavatkozás előtt és után. (6. ábra)



6. ábra: Az 1001. napon történt 20 K hőmérsékleti impulzus hatása a gyorsabb és a lassabb szaporodási képességű ökoszisztéma összetételére, TEGMa modell kísérletei során, 294 K hőmérsékleten

Fontos megvizsgálni, hogy a diverzitás és az adaptálódottság hogyan alakul a kisebb mértékű impulzusok során. Az elméleti ökoszisztéma egyedeinek eloszlása és diverzitása erősen függ attól, hogy milyen sebességi paramétert állítunk be a szimulációk során. A kisebb mértékű hőmérsékleti impulzusok (3K, 5K) a gyorsabb sebességi paraméterű ökoszisztéma diverzitását megnöveli a TEGMa típusú szimulációban. A TEGMb modellt alkalmazva a diverzitás értéke 5K impulzus esetén folyamatosan növekszik 30 éven át, 3K esetén pedig folyamatosan csökken. A lassabb szaporodási képességű ökoszisztémában nagyobb mértékű (10K, 15K, 20K) impulzus okoz diverzitásnövekedést, a kétféle modell (TEGMa és TEGMb) esetén azonos mértékben. Az új egyensúlyi állapot kialakulásának ideje az $r=0,1$ és $T=294K$ paraméterekkel jellemzett ökoszisztéma esetén a leglassabb.

Egységugrás vizsgálata

Az egységugrás vizsgálatokor a konstans hőmérséklet értékét az 1001. napon változtattam meg. A hőmérséklet kiindulási értékének 293 K hőmérsékletet választottam, ez megfelel a S13, K7, G4 és SZG1 fajok optimális szaporodási hőmérsékletének. Ezen a hőmérsékleten változatlan feltételek mellett az előző sorrendnek megfelelően alakul a nagyság szerinti eloszlás.

A 294 K konstans hőmérsékleten történő szimulációs kísérletekben az 1001. napon bekövetkezett hőmérsékleti ugrás hatására sem a lassabb, sem a gyorsabb ökoszisztéma esetén

lényegileg nem változik az egyensúly összetétele (S14 megjelenik 10 egyedszámmal). A 294 K hőmérsékleten stabil (S13-S14 fajok egyenlő 5 milliós nagyságban) ökoszisztéma hőmérsékletének megváltozása 293 K hőmérsékletre az új hőmérsékletnek megfelelő egyensúly beállítását eredményezi (20 nap alatt).

Az ökoszisztéma Shannon diverzitás-index értékeinek alakulását megfigyelve azt tapasztaljuk, hogy hőmérséklettől függően egy lokális maximum értéken keresztül éri el az új egyensúlyi állapothoz tartozó diverzitást a rendszer.

Ha a 293 K hőmérsékleten stabil összetételű ökoszisztéma hőmérsékletét 1 K-nel megemeljük, akkor az alapeset egyensúlyi állapotát valós időn belül nem érhetjük el. Fordított esetben (294 K-ről 293 K-re változtatva a hőmérsékletet) ez nem jelentkezik. +2K egységugrásnál az adott hőmérsékleten legjobban specialista nem tud legnagyobb egyedszámmal jelen lenni.

Egységsebesség vizsgálata

Az egységsebesség vizsgálata során 268K hőmérsékletről indítva naponként emeltem a hőmérsékletet különböző mértékben (0,0001K...0,01K). A napi hőmérsékleti növekménytől függően észlelhető az egyes fajok előretörése. A diverzitás helyi maximumai akkor keletkeznek, amikor a specialista vagy közepes fajok éppen cserélődnek egymással.

Napi véletlen zavarás

Konstans hőmérsékletre adott véletlen szóródás esetén egyes fajok eltűnnek az ingadozás mértékétől függően. Először, már $\pm 1K$ véletlen hőmérsékleti ingadozás hatására eltűnik az addig nagy mennyiségben jelen levő specialista (pl. 295K esetén az S14 faj), majd az átmeneti, és $\pm 5K$ esetben már csak a szupergeneralista (a példában az SZG1) faj van csak jelen. Általánosan elmondható, hogy a nagy hőmérsékleti ingadozás hatására ($\pm 10K$ szóródás felett) teljesen eltűnnek a fajok. Az ökoszisztéma diverzitásának értéke a hőmérsékleti ingadozáson kívül erősen függ a beállított hőmérséklet értékétől is. A legnagyobb diverzitás értéket akkor érjük el, amikor a beállított hőmérséklet egy fajnak sem optimális a szaporodáshoz (294 K). A gyorsabb szaporodási képességű ökoszisztéma diverzitás értékei alacsonyabb helyi maximum értéket vesznek fel, mint a lassabban növekvő ökológiai rendszerek.

Szinuszos hőmérsékleti mintázat esetén az évi összes egyedszám értéke változik az évenkénti ingadozás (s_1 , azaz a szinusz függvény amplitúdója) és a napi véletlen zaj ($0 \dots \pm 7K$) függvényében is. A kétféle ingadozás azt eredményezi, hogy $\pm 7K$ véletlen zavar esetén már jelentősen lecsökken az egyedszám és a források kihasználtsága csekély lesz.

A lineárisan növekvő hőmérsékleti mintázatnál a nagyobb meredekségű (0,005K/nap és 0,01K/nap) hőmérsékleti függvények esetén a forráskihasználás értéke a nagy véletlen ingadozás hatására ($\pm 7K$) nem csökken le zérus értékre, mint ez a csökkenés a kisebb meredekségű eseteknél

megtörténik. Ez azért lehet, mert a szupergeneralista fajok optimális hőmérsékleteit ezekben az esetekben érjük csak el, és ezek azok a fajok, amelyek legkevésbé érzékenyek a naponkénti hőmérsékleti ingadozásra. A kisebb sebességű folyamatnál ez nem érvényesül.

AZ ELMÉLETI ÖKOSZISZTÉMA SZABÁLYOZÓ HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA A KLÍMÁRA

Az 1960-1990 közötti budapesti napi középhőmérsékleti értékekre az elméleti ökoszisztéma a nyári, ill. az őszi időszakban fejthet ki hűtő hatást akár 3K, ill. 2K hőmérséklet különbségig; míg a tavaszi és a téli időszak alatt kevésbé jelenik meg a biotikus visszacsatolás.

Ha az antropogén hatásokat is figyelembe vesszük, akkor a nyári időszakban a visszacsatolás, az ökoszisztéma „hűtő” hatása már nem következik be, így az antropogén hatásból származó felmelegedéséhez még hozzáadódik a biotikus hatásokból eredő is. Az őszi időszaknál is megfigyelhető hasonló; míg tavasszal és télen némileg csökkenhet a hőmérséklet.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- Megalkottam a TEGM-modellt és az alkalmazásához szükséges számítási sémát. Az elméleti matematikai modell segítségével vizsgálható az ökoszisztéma összetételének alakulása különböző hőmérsékleti mintázatok során.

TEGM modell megállapításai különböző hőmérsékleti feltételek mellett

- A hipotetikus konstans hőmérsékleten végzett (293K, 294K, 295K) szimulációs kísérletek egyensúlyra való beállása nem történik meg 30 év alatt a TEGMb modellel végzett, $r=1$ paraméterű szimulációk során. A különböző hőmérsékleti paraméter beállítások vizsgálat során a lassabb szaporodási sebességgel ($r=0,1$) jellemzett elméleti vízi ökoszisztéma hamarabb tapasztalható az egyedszám csökkenés, valamint a biológiai sokféleség alakulásában is nagyobb változások játszódnak le, mint a nagyobb sebességi faktorral jellemzett ökoszisztéma esetében. Kisebb sebességgel jellemzett szimulációk esetében az egyedszám már kisebb zavarás mellett jelentősen lecsökken, a biológiai sokféleséget tekintve elmondható, hogy ezek a közösségek diverzebbek.
- Az évi hőmérsékleti ingadozást szinusz függvény szerint meghatározva megállapítható, hogy a sebességi faktor lecsökkentésével a fajok egyedszáma jelentősen lecsökken. Amíg az évi napi átlaghőmérsékleti függvény amplitúdója csekély ($s_I=2$ ill. 8), addig még van érzékelhető mennyiségű egyed, de az amplitúdó növekedésével a fajok eltűnnek. A szinuszos évi ingadozás amplitúdójának kismértékű növekedése a diverzitás értékét - a konstans esethez hasonlóan - megnöveli.
- Az egy éven belüli átlagos összes egyedszám értéke adott faj esetén csökken a jövőben (2070-2100-ra jóslott időjárási adatsorokra, MPI 3009 és HC adhfa, HC adhfd), a csökkenés mértéke eltérő a különböző előrejelzések eredményeinél. A magyarországi historikus adatokat összehasonlítva a 2100-ra scenáriók által jóslott analóg helyek (Kairó, Turnu Magurele) szintén historikus értékeivel azt tapasztalhatjuk, hogy a gyorsabb szaporodási képességű fajnál az összes egyedszám évi értéke változatlan, illetve Kairó esetén egy kicsit emelkedettebb, a forráskihasználás is az előbbiekhöz hasonlóan változik. A lassabb folyamat esetén az összes egyedszám értéke csökken Turnu Magurele esetén, Kairó esetén pedig jelentősen megnő (10-szeresére). A diverzitás tekintetében a múltbeli adatokhoz képest két jóslott időjárási adatsorra (HC adhfa, MPI 3009) növekszik némiképp az egy évre számított diverzitás-index, a HC adhfd viszont azonos képet mutat. Ez a megfigyelés mind a lassabb, mind a gyorsabb ökoszisztémánál hasonló módon alakul.

Diszturbancia hatása egy elméleti közösség alkalmazkodására

- Kis és közepes mértékű hőmérsékleti impulzusok hatására a kialakuló új egyensúlyi állapot jelentős mértékben különbözik a beavatkozás előtti állapothoz képest.
- Hőmérsékleti egységugrás hatását elemezve azt találtam, hogy a kiindulási hőmérsékleten egyensúlyban levő ökoszisztéma összetétele meghatározza, milyen lesz az ökoszisztéma diverzitása a hőmérsékletugrás hatására.
- Ha a hőmérséklet lineárisan lassan változik az időben, akkor az adott hőmérsékletnek leginkább kedvező specialisták és átmeneti fajok vannak leginkább jelen az ökoszisztémában. A szupergeneralista faj alig észrevehető mennyiségben észlelhető.
- Általánosítva elmondható, hogy a naponkénti véletlen ingadozás emelésével a specialista fajok már $\pm 1\text{K}$ ingadozás hatására eltűnnek a domináns fajok közül, a generalista fajok még kis mértékben elviselik a $\pm 6-7\text{K}$ naponkénti ingadozás, de e fölött már csak a szupergeneralista fajok jelennek meg maximum $\pm 10-11\text{K}$ ingadozásig.
- A TEGM modellel végzett szimulált kísérletek során megfigyelhető a köztes zavarási elmélet mind a lassabb, mind a gyorsabb lefutású ökoszisztémák során. A napi ingadozást, illetve az évi ingást növelve (szinuszos függvényt bevezetve) kis zavarás hatására a diverzitás növekszik, majd a zavarás növekedésével újra lecsökken.

Klíma-ökoszisztéma rendszer szabályozó hatása

- Ha nincs jelen az antropogén hatás a növényzet „hűtő” hatásának $0-2,5\text{ K}$ hőmérsékletek felelnek meg a hónapoktól, évszakoktól függően. Ha figyelembe vesszük az ember által a légkörbe juttatott szén-dioxid mennyiségét, és ezáltal okozott globális felmelegedés mértékét, akkor azt tapasztaltam, hogy 100 év elteltével a növények „hűtő” hatása lecsökken $0-1,3\text{ K}$ értékre.

KÖVETKEZTETÉSEK

A kidolgozott, kompetitív elven működő elméleti ökoszisztéma modell az elvárásoknak megfelelően reagál a különböző hőmérsékleti beállításokra. A hipotetikus konstans hőmérsékleten végezve a kísérleteket a szűk tűrőképességű fajok vannak jelen a legnagyobb egyedszámmal, és a tágabb tűrőképességű, adott hőmérsékleten alacsonyabb szaporodási rátával rendelkező fajok egyre kisebb egyedszámmal.

A napok közötti hőmérsékleti ingást figyelembe vevő kísérleteknél láthatjuk, hogy az ingadozás növekedése az egyre tágabb tűrőképességű fajok előretörésének kedvez. A mesterséges édesvízi alga-közösséget leíró modell szimulációs kísérletei során mutatja a terepi ökológusok megfigyelései szerinti Közepes Bolygatási Hipotézis (IDH) meglétét, amely szerint a közepes zavarások (esetünkben hőmérsékleti ingadozások) esetén tapasztalható a legnagyobb biológiai sokféleség.

Szimulációs kísérleteim során a magyarországi historikus hőmérsékleti adatsorok generálta ökoszisztéma-összetételi eredményeket összehasonlítottam a különböző 2070-2100 időszakra jósolt hőmérsékleti adatsorok eredményeivel. A nagy klíma-központok (HC, MPI) globális előrejelzéseiből regionális illesztésekkel kapjuk a magyarországi területi eredményeket. Az újabb regionális előrejelzések (HC adhfa, adhfd, és MPI 3009) egyértelműen az egyedszám csökkenését jelzik előre az elméleti ökoszisztéma vizsgálata során. Magyarországra vonatkozó 140 éves napi hőmérsékleti adatsor eredményei azt mutatják, hogy a nyári időszakban nagy változások lesznek, a fajgazdagság lecsökken. Az évi összes produktivitás mértéke és az éves diverzitás értéke egyértelmű csökkenést jelez előre. Az eredmények egyezést mutatnak a tapasztaltakkal, az átlaghőmérséklet növekedése során csökkenthet a biomassza mennyisége és a biodiverzitás.

A mesterséges édesvízi alga-közösség hőmérsékleti impulzus hatására az impulzus nagyságától függően (1K-100K mértékig) eltérően reagál. Ha az ökoszisztémát közepes mértékű lökészerű zavarás éri, akkor a kialakuló egyensúlyi állapot eltér az adott konstans hőmérsékleten várható összetételtől. A hőmérsékletben történő 1K ugrás-változás nem változtatja meg az ökoszisztéma faj-összetételét 293K és 295K konstans hőmérsékletek esetében. Így a specialista S13 ill. S14 faj marad a legerősebb a versengés során. 294K hőmérsékleten történő 1K hőmérsékletugrás során már az adott hőmérsékleten optimális szaporodási képességgel rendelkező S14 faj szorítja ki a többit. A konstans hőmérsékleten történő kisméretű impulzus hatására a teret egymás között egyenlő arányban felosztó S13 és S14 fajok versengésében az a faj kerül ki győztesen, amelyik hőmérsékleti optimuma közelebb van az impulzus során kialakult hőmérséklethez.

Ha a hőmérséklet lineárisan változik az időben, a specialista és a közepes tűrőképességű fajok versengését figyelhetjük meg az idő függvényében. A versengés során ott figyelhető meg a

legnagyobb diverzitás érték, ahol a fajok éppen cserélődnek, vagyis kiszorítja egyik faj a másikat, és a közösség jelentősen átalakul.

A napok közti véletlen jellegű hőmérsékleti ingadozás hatását a TEGMb modell vizsgálatával végeztem el. Konstans hőmérsékleti paraméter beállítás mellett a vizsgált elméleti ökoszisztéma modelljének futtatása során kialakult csúcsok vizsgálatánál megállapítható, hogy két helyi maximum fordul elő a diverzitás értékében a véletlen ingadozás növekedésének függvényében. A helyi maximum görbék alakja a zavarás függvényében úgy alakul, hogy lassan növekszik és gyorsan letörik. A napi véletlen ingadozás növekedésével a fajok átrendeződnek a speciális és átmeneti fajok eltűnésével és a generalista fajok előretörésével. Az IDH alakja a fajok cserélődését jól mutatja, mivel egy faj produktivitásának növekedése lassabban megy végbe, mint a kihalása diszturbanciák hatására.

Az ökoszisztéma szabályozó hatását modellezve azt találtam, hogy az antropogén hatások figyelembevételével az ökoszisztéma produktivitása mind éves, mind napi szinten jelentősen változott az antropogén hatástól mentes esethez képest. A produktivitás összefüggésben áll a légkörben levő szén-dioxid mennyiségével, a kifejlődő növényzet szénét köt meg a légkörben levő mennyiségből. Abban az esetben, amikor nincs jelen az antropogén hatás a növényzet „hűtő” hatásának 0-2,5 K hőmérsékletek felelnek meg a hónapoktól, évszakoktól függően. Ha figyelembe vesszük az ember által a légkörbe juttatott szén-dioxid mennyiségét, és ezáltal okozott globális felmelegedés mértékét, akkor azt tapasztaltam, hogy 100 év elteltével a növények „hűtő” hatása lecsökken 0-1,3 K hőmérséklettartományig. Mindez azt jelenti, hogy az növényzet klímára való szabályozó képessége miatt további maximum 1,2 K hőmérsékletnövekedés fog bekövetkezni az antropogén felmelegedésen kívül.

Az általam kidolgozott TEGMm elméleti algaközösség stratégiai modelljét Sipkay és munkatársai (2008, 2009, 2010) valós terepi (dunai) adatokra adaptálva kidolgozták a Dunai Fitoplankton Modell (DPGM-modell). Az optimalizáció során 21 elméleti populáció lineáris kombinációjával sikerült a legjobb illesztést elérni az összes fitoplankton biomasszájának szimulációjában, ezáltal elvégezve a felmelegedés hatásait vizsgáló esettanulmányokat.

PUBLIKÁCIÓK

Idegen nyelvű tudományos folyóiratcikkek

1. Drégelyi-Kiss, Á., Drégelyi-Kiss, G., Hufnagel, L. (2008): Ecosystems as climate controllers – biotic feedbacks (a review), *Applied Ecology and Environmental Research* 6(2): 111-135
2. Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L. (2009): Simulations of Theoretical Ecosystem Growth Model (TEGM) during various climate conditions. *Applied Ecology and Environmental Research* 7(1): 71-78.
3. Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L. (2010). Effects of temperature-climate patterns on the production of some competitive species on grounds of modelling. *Environ Model Assess*, doi:10.1007/s10666-009-9216-4
4. Drégelyi-Kiss, Á., Gimesi L., Homoródi, R., Hufnagel L. (2010): Examination the interaction between the composition of a theoretical ecosystem and the increase in the atmospherical CO₂ level, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* 38(2): 201-206.
5. Hufnagel, L., Drégelyi-Kiss, Á., Drégelyi-Kiss, G. (2010): The effect of the reproductivity's velocity on the biodiversity of a theoretical ecosystem, *Applied Ecology and Environmental Research* 8(2): 119-131.
6. Sipkay, Cs., Horváth, L., Nosek, J., Oertel, N., Vadadi-Fülöp, Cs., Farkas, E., Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L. (2008): Analysis of climate change scenarios based on modelling of the seasonal dynamics of a Danubian copepod species. *Applied Ecology and Environmental Research* 6(4): 101-108
7. Vadadi-Fülöp, Cs., Türei, D., Sipkay, Cs., Verasztó, Cs., Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L.(2009): Comparative assessment of climate change scenarios based on aquatic food web modelling. *Environmental Modeling and Assessment*, 14 (5): 563-576.

Magyar nyelvű tudományos folyóiratcikkek

1. Drégelyi-Kiss Á., Hufnagel L. (2010): Elméleti ökoszisztéma modell (TEGM) szimulációs kísérletei különböző hőmérsékleti mintázatok hatására, *Óbuda University e-Bulletin*, 1 (1): 293-300.
2. Sipkay Cs., Kiss K. T., Drégelyi-Kiss Á., Farkas E., Hufnagel L. (2009): Klímaváltozási scenáriók elemzése a dunai fitoplankton szezonális dinamikájának modellezése alapján, *Hidrológiai Közöny* 89(6): 56-59.

Konferencia kiadvány (full paper)

1. Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L. (2010): Klíma-ökoszisztéma rendszer stratégiai modellezése egy elméleti fajegyüttes példáján, *XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár*, 2010. március 25-26., pp. 83-86.

Konferencia kiadványban megjelent összefoglaló (abstract)

1. Drégelyi-Kiss Ágota, Hufnagel Levente: Egy mesterséges ökoszisztéma összetétele és a légköri CO₂-szint növekedése közötti kölcsönhatások vizsgálata, *Mobilitás és Környezet: a járműipar kihívásai az energetika, a szerkezeti anyagok és a környezeti kutatások területén*, Veszprém, 2010. augusztus 23-25.
2. Sipkay Cs., Kiss Keve T., Drégelyi-Kiss Á., Farkas E., Hufnagel L.: Klímaváltozási scenáriók elemzése a dunai fitoplankton szezonális dinamikájának modellezése alapján, *L. Hidrobiológus Napok- A hazai hidrobiológia 50 éve*, Tihany, 2008. október 1-3.
3. Drégelyi-Kiss, Á., Hufnagel, L.: The effect of disturbance on the adaptation of a community in a competition model, International Biometric Conference, Floripa, Brazil, 5 – 10 December 2010

Könyvfejezet, könyvrészlet

1. Harnos, Zs., Gaál, M., Hufnagel, L. (szerk) (2008): Klímaváltozásról mindenkinek - Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest. ISBN 978-963-503-384-3
2. Hufnagel, L (szerk), Sipkay, Cs, Drégelyi-Kiss, Á., Farkas, E., Türei, D., Gergócs, V., Petrányi, G., Baksa, A., Gimesi, L, Eppich, B., Dede, L., Horváth, L. (2008): Klímaváltozás, Biodiverzitás és közösségökológiai folyamatok kölcsönhatásai. pp. 275-300. In: Harnos, Zs, Csete, L. (szerk): *Klímaváltozás: Környezet-Kockázat-Társadalom*, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.
3. Sipkay, Cs., Drégelyi-Kiss, Á., Horváth L., Garamvölgyi, Á., Kiss, K. T., Hufnagel, L. (2010): Community ecological effects of climate change. In Climate change and variability, Sciyo Books, www.sciyo.com, ISBN 978-953-7619-X-X